

## KAYAÇ KAZILABİLİRLİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİNDE CCS TİP MİNİ DİSK KESKİ KULLANILMASI

<sup>1</sup>Ramazan ÇOMAKLI, <sup>2</sup>Cemal BALCI

<sup>1</sup>*İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İSTANBUL*

<sup>2</sup>*İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İSTANBUL*

<sup>1</sup>[rcomakli@itu.edu.tr](mailto:rcomakli@itu.edu.tr), <sup>2</sup>[cemalb@itu.edu.tr](mailto:cemalb@itu.edu.tr)

(Geliş/Received: 19.11.2014; Kabul/Accepted in Revised Form: 23.02.2015)

**ÖZET:** Kayaç kazılabilirlik özelliklerinin belirlenmesinde en çok kullanılan deneylerden biri laboratuvar ortamında yapılan tam boyutlu kazı deneyleridir (LCM). Bu deney setinde gerçek disk keskinin kullanılması güvenilirliğini artırmaktadır ancak bu deney seti uygulamada birçok dezavantaja sahiptir. Deneyler için büyük blok numunelerin kullanılması ve çok fazla insan gücüne gerek duyulması bunlardan bazılarıdır. Büyük boyutlu kazı deney setinde karşılaşılan bu dezavantajlar değerlendirilerek yürütülen bir TÜBİTAK projesi kapsamında İTÜ kazı mekaniği laboratuvarında daha küçük boyutlarda yeni bir taşınabilir doğrusal kazı deney seti (PLCM) geliştirilmiştir (TÜBİTAK-112M859). Geliştirilen bu deney setinde gerçek disk keskinle aynı özelliklere sahip fakat daha küçük boyutlarda mini disk keskin kullanılmıştır. Bu çalışmada mini disk keskinle yapılan kaya kesme deney sonuçlarının güvenilirliğinin belirlenmesi için, aynı numune üzerinde LCM ve PLCM deneyleri yapılmış ve deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda yardımcı ve yardımcı olmayan kaya kesme deneyleri için LCM ve PLCM deney sonuçları arasında iyi bir ilişki elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Disk keski, Mini disk keski, LCM, PLCM.

### Determination of Rock Excavability Properties by Use of CCS Type Mini Disc Cutter

**ABSTRACT:** Linear cutting machine (LCM) tests are one of the most used laboratory test for determine of rock cuttability. Using the real disc cutters in this machine improve the reliability but this test method have some disadvantages. The basic disadvantage of the full-scale linear rock cutting test is that it requires too much manpower and large blocks of rock samples, which are usually difficult, too expensive, or impossible to obtain. For these reasons a new portable linear rock cutting (PLCM<sup>®</sup>) machine was developed in the Mining Engineering Department of Istanbul Technical University and supported by The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK-112M859). In this new portable linear cutting machine, mini disc cutter were used for rock cutting tests. Mini disc cutter is smaller than real cutters but it has same properties with a real disc cutter.

In this study for determine the reliability of PLCM relieved and unrelieved linear rock cutting tests were performed on same rock sample with newly developed machine PLCM<sup>®</sup> and LCM then tests results were compared. The result of these comparisons a good relationship was obtained between LCM and PLCM tests results.

**Key Words:** Disc cutter, Mini disc cutter, LCM, PLCM.

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kayaç kazılabilirlik özelliklerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri laboratuvar ortamında yapılan kaya kesme deneyleridir (ISRM, 1981). Bu deney yöntemlerinin

ülkemizde ilk kullanımı özellikle 1980' li yıllardan sonra İTÜ ve ODTÜ' de kazı mekaniği alanında yapılan çalışmalarla hız kazanmıştır (Bilgin ve Shahriar, 1987; Ceylan, 1987). İTÜ' de kazı mekaniği alanında ilk çalışmalar küçük boyutlu kazı deney setinin kurulmasıyla başlamıştır (Bilgin ve Shahriar, 1987). Küçük boyutlu kazı deney seti McFeat-Smith ve R.J.Fowell tarafından geliştirilmiş standart bir laboratuvar deneyidir (McFeat Smith, ve Fowell, 1977). Daha sonra yapılan farklı çalışmalar sonucunda bu deney seti ülkemizde farklı üniversitelerde de kullanılmaya başlanmıştır (Dursun, 2012).

Ülkemizde 1990 yılların ikinci yarısında tam kesitli tünel açma makinalarının (TBM) kullanıldığı projelerinin artmasıyla beraber disk keskilerle deneysel çalışmalar yapmaya imkân tanıyan tam boyutlu kazı deney seti (LCM) İTÜ Maden Mühendisliği Bölümünde NATO – TU projesi çerçevesinde kurulmuştur (Eskikaya ve diğ., 2000).

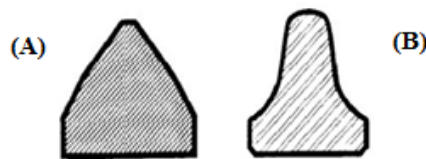
Bir sonraki aşamada ise taşınabilir bir doğrusal kazı deney setinin geliştirilmesine yine İTÜ Maden Mühendisliği Bölümünde başlanılmıştır (Bilgin ve diğ., 2006). Tüm bu gelişmelerle birlikte kazı mekaniği alanında birçok çalışma yapılmıştır (Balcı, 2004; Balcı ve Bilgin, 2007; Feridunoğlu, 2009; Tumaç, 2010).

Ülkemizde kazı mekaniği alanında büyük boyutlu kazı deney seti üzerinde disk keskiler kullanılarak deneysel çalışmaların yapılması 2000' li yıllarda başlasa da TBM' lerde disk keskilerin kullanımı çok eskilere dayanmaktadır. Şöyle ki; 1851 ve 1881 yıllarında tasarlanan ilk tünel açma makinelerinde disk keskiler kullanılmamış olup kesici kafa üzerine keskiler konsantrik daireler çizerek şekilde yerleştirilmiştir (Friant, 1994; Stack, 1995). Daha sert ve aşındırıcı formasyonlarda ise kama uçlu keskilerin çok fazla miktarda aşındığı gözlemlenmiş ve kesici kafada sadece disk keskilerin kullanılmasına karar verilmiş ve böylece daha fazla ilerleme kaydedildiği ortaya çıkmıştır (Franklin ve Dusseault, 1989). Değişen ihtiyaçlar doğrultusunda hem TBM hem de kullanılan disk keskilerin özellikleri değişmiş olup yıllara göre ortaya çıkan değişimler Çizelge 1' de verilmiştir.

**Çizelge 1:** Tam cepheli tünel açma makinalarının özelliklerinin gelişimi (3.5 metre çapındaki makine için) (The Robbins Company, 2001) (Development of TBMs (for machine with 3.5 m diameter)).

Yıl	Disk Keski Çapı (mm)	Keskiler Arası Mesafe (mm)	Keski Başına Düşen Baskı Kuvveti (kN / Keski)	Kesici Kafa Gücü (kW)
1956	280	68	55	250
1970	305	65	100	300
1980	394	67	190	600
1990	483	70	250	1350
2000	483	70	260	1350

Disk keskilerin TBM kesici kafasında kullanımının artmasıyla birlikte disk keskiler kazı veriminin artırılması amacıyla farklı şekillerde üretilmiştir. Tek diskli veya çok sıralı olarak üretimi yapılan disk keskilerde, tek diskli keskiler önceleri sadece V tipli olarak üretilirken aşınma miktarının azaltılması amacıyla daha sonraları ucu küt şekilli olan sabit kesitli (CCS tip) disk keskiler üretilmiş ve bu keskiler bir standart olarak kabul görmüştür. Şekil 1' de V tip ve CCS tip disk keskilere ait ring profilleri verilmiştir.



**Şekil 1:** Disk keskilerde ring profili; (A) V-tip, (B) CCS tip (Maidle, ve diğ., 2008) (ring profile for disc cutters A: V – type, B: CCS type).

Disk keskilerin tasarımılandırılmasında kazı esnasında kaya ile etkileşimine bağlı olarak şu parametrelerin etkili olduğu belirlenmiştir (Roxborough ve Phillips, 1975; Bilgin, 1989);

- Keski Arası Mesafe, s (mm)
- Kesme Derinliği, d (mm)
- Disk kalınlığı, w (mm)
- Disk çapı, R (mm)
- Disk açısı
- Kayaç sökülme açısı
- Yuvarlanma Kuvveti, FR (kN)
- Normal Kuvvet, FN (kN)
- Yanal Kuvvet, FS (kN)

Disk keski tasarım parametrelerinin kazılabilirlik üzerine etkileri Roxborough, ve Phillips tarafından 1975 yılında yapılan bir çalışma kapsamında araştırılmıştır. Bu çalışmada disk keski çapı, kesme derinliği, disk keski uç açısı, kesme hızı ve keski arası mesafe değerleri değiştirilerek deneyler yapılmıştır. Yapılan bu deneyler sonunda keski üzerine etki eden normal ve yuvarlanma kuvvetlerinin teorik olarak hesaplanabileceği bir model elde edilmiştir. Eşitlik 1' de keski üzerine etki eden normal kuvvetin disk keski çapı (D), kesme derinliği (d), kayacın tek eksenli basınç dayanım değeri ( $\sigma_c$ ) ve disk keski uç açısı ( $\theta$ ) değerlerine bağlı olarak elde edilen eşitlik verilmiştir.

$$F_N = 4 \cdot \sigma_c \cdot d \cdot \tan \frac{\theta}{2} \sqrt{D \cdot d - d^2} \quad (1)$$

Diske etki eden yuvarlanma kuvvetinin hesaplanmasında ise yuvarlanma kuvveti ve normal kuvvet arasındaki ilişkiler irdelenmiş ve sonuç olarak Eşitlik 2 elde edilmiştir.

$$\frac{F_N}{F_R} = \sqrt{\frac{D-d}{d}} \quad (2)$$

Daha sonra Eşitlik 2' de elde edilen sonuç Eşitlik 1' de yerine yazılarak yuvarlama kuvvetinin hesaplanabilmesi için Eşitlik 3 elde edilmiştir.

$$F_R = 4 \cdot \sigma_c \cdot d^2 \cdot \tan \frac{\theta}{2} \quad (3)$$

Roxborough ve Phillips (1975) tarafından önerilen model daha sonra Phillips, Bilgin ve Price (1978) tarafından keski uç yarıçapının etkisi de incelenerek geliştirilmiştir. Geliştirilen bu modelde keski uç yarıçapının etkisi Eşitlik 4 ve Eşitlik 5' te verildiği gibi çarpan olarak eklenmiştir.

$$F_{Nr} = F_N \cdot e^{Ar} \quad (4)$$

$$F_{Rr} = F_R \cdot e^{Br} \quad (5)$$

Burada;

$F_{Nr}$  : Normal kuvvet (kN)

$F_{Rr}$  : Yuvarlanma kuvveti (kN)

r : Keski uç yarıçapı (mm)

A, B : Her bir ilerleme seviyesi için sabitler

A ve B sabitlerinin hesaplanabilmesinde iki farklı keski uç yarıçapı için Eşitlik 6 ve Eşitlik 7 verilmiştir. Burada 'p' kesme derinliği değerini temsil etmektedir.

$$A = 0,0354 + \frac{0,6554}{p} \quad r = 0,98 \quad (6)$$

$$B = 0,060 + \frac{0,383}{p} \quad r = 0,87 \quad (7)$$

Özdemir ve diğ. (1978), kazı esnasında disk keskiye etki eden kuvvetlere bağlı olarak keski altında oluşan kırılma zonunun oluşumunu araştırmışlardır. Bu araştırmalar ileri yıllarda devam ettirilerek Rostami ve Özdemir (1993), CCS tipli disk keski için keski üzerine etki eden kuvvetlerin

hesaplanabilmesi için bir teori geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu teoride keski üzerine etki eden toplam kuvvet ve kesme katsayısı değerleri kullanılarak normal ve yuvarlama kuvvetleri hesaplanmıştır. Bu teoriye göre toplam kuvvet değeri ( $F_T$ ) Eşitlik 8 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$F_T = \frac{P.R.T.\gamma}{\psi+1} \quad (8)$$

Burada;

P : Yüzeye uygulanan basınç (MPa)

R : Disk keski yarıçapı (mm)

T : Keski ucu kalınlığı (mm)

$\psi$  : CCS tip keski için  $\psi$  değeri sıfıra yakındır ve artan keski ağız genişliği ile azalır. V tip keski için bu değer 1 civarındadır.

Eşitlikte verilen ' $\gamma$ ' değeri ise disk keski yarıçapı ve kesme derinliğine bağlı olarak Eşitlik 9 kullanılarak elde edilmektedir.

$$\gamma = \cos^{-1} \left( \frac{R-d}{R} \right) \quad (9)$$

Burada;

R : Disk keski yarıçapı (mm)

d : Kesme derinliği (mm)

Disk üzerine etki eden toplam kuvvetin hesaplandığı Eşitlik 8' de P dışındaki bütün değişkenler bilinmektedir. P ise kesme geometrisi (keskiler arası mesafe ve kesme derinliği) ve kaya özelliklerinin (basınç ve çekme dayanımı) bir fonksiyonu olarak tanımlanmış ve P değerinin belirlenebilmesi için Eşitlik 10 verilmiştir.

$$P = C \cdot \sqrt[3]{\frac{s \cdot \sigma_c \cdot \sigma_t}{\gamma \cdot \sqrt{R \cdot T}}} \quad (10)$$

Burada;

C : Birimler arası dönüşüm katsayısı  $\approx 2,12$

s : Keskiler arası mesafe (mm)

$\sigma_c$  : Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)

$\sigma_t$  : Kayacın çekme dayanımı (MPa)

Keskiler üzerine etki eden toplam kuvvet belirlendikten sonra normal kuvvet ( $F_N$ ) ve yuvarlama kuvvetinin ( $F_R$ ) hesaplanması için Eşitlik 11 ve Eşitlik 12 kullanılabilir.

$$F_N = F_T \cdot \cos \left( \frac{\gamma}{2} \right) \quad (11)$$

$$F_R = F_T \cdot \sin \left( \frac{\gamma}{2} \right) \quad (12)$$

Morrell ve diğ. (1970) tarafında tasarım parametrelerinin değişimiyle ilgili farklı bir çalışma yapılmış ve yapılan bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak değişen her bir parametre için 90° uç açılı disk keski ile 60° uç açılı disk keski arasında bir oran belirlemiştir.

Bilgin (1977), yaptığı çalışmada disk keski tasarımı parametrelerinin değişimine bağlı olarak keski üzerine etki eden kuvvetlerin ve spesifik enerjinin değişimini incelemiştir. Bu çalışma sonucunda disk uç açısı arttıkça keski üzerine etki eden kuvvetlerin ve spesifik enerjinin arttığı buna karşın disk çapı değiştiğinde spesifik enerjinin değişmediği, kesme derinliği arttıkça keski üzerine etki eden kuvvetlerin artarken spesifik enerjinin azaldığı sonuçlarına varılmıştır.

Balcı, ve Tumaç, (2012), tasarım parametrelerinin kazılabilirlik üzerine etkisini araştırırken CCS tip disk keskiyle birlikte V tip disk keski de kullanmışlardır. Her iki disk keskiyle kazı deneyleri yaparak elde edilen sonuçlar kıyaslanmış ve sonuç olarak CCS tip disk keski üzerine V tip disk keskiye oranla daha fazla kuvvet değerinin etki ettiği sonucuna varılmıştır.

### TAM BOYUTLU DOĞRUSAL KAZI DENEY SETİ (LCM) (Full Scale Linear Cutting Machine)

İTÜ Maden Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü Kazı Teknolojileri ve Maden Makinaları Laboratuvarı'nda tam boyutlu doğrusal kaya kesme deney seti (LCM) NATO-TU projesi çerçevesinde kurulmuştur (Şekil 2) (Eskikaya ve diğ., 2000). Bu deney setinde gerçek boyuttaki keskiyle (disk, kalem uçlu keski vb.) hidrolik silindirlere yardımıyla, farklı kesme derinliklerinde keski arası mesafeler değiştirilmekte, bu sayede bu değerler için normal kuvvetler, kesme kuvvetleri, yanal kuvvetler ve spesifik enerji değerleri bulunabilmektedir. Bulunan bu değerler kullanılarak; tam cepheli tünel açma makineleri (TBM), kısmi kesitli tünel açma makineleri (roadheader), kesici yükleyiciler (shearer-loader), sürekli kazıcılar (continuous miner) gibi mekanize kazı makinelerinin performansları tahmin edilebilmektedir.



**Şekil 2:** İTÜ Maden Mühendisliği Bölümü Kazı Mekanizasyonu ve Teknolojileri Laboratuvarında bulunan tam boyutlu doğrusal kazı deney seti (Full scale linear cutting machine in İTÜ).

#### 432 mm CCS tip disk keski (432 mm CCS type Disc Cutter)

Tam boyutlu doğrusal kazı deney setinde yapılan kesme deneylerinde 432 mm CCS tip disk keski kullanılmıştır. Kullanılan bu keski tünel açma makinelerinde kullanılan gerçek bir disk keskidir. Tek diskli keski V tip ve CCS tip disk keski olmak üzere ikiye ayrılmakta ve V tip disk keski keski ucunun sivri V tipli oluşundan bu isimle adlandırılırken CCS tip disk keski ise sabit kesit alanlı keski olarak adlandırılır (Şekil 1).

LCM kaya kesme deneylerinde kullanılan 432 mm CCS tip disk keski; 432 mm disk çapına ve 18 mm uç genişliğine sahiptir (Şekil 3).



**Şekil 3:** LCM kaya kesme deneylerinde kullanılan 432 mm CCS tip disk keski (432 mm CCS type disc cutter used for LCM rock cutting tests).

#### **TAŞINABİLİR DOĞRUSAL KAZI DENEY SETİ (PLCM) (Portable Linear Cutting Machines)**

Taşınabilir doğrusal kazı deney seti laboratuvar ortamında yapılan birçok kaya kesme deneyi sonucunda karşılaşılan büyük blok ihtiyacı, çok fazla insan gücü gibi sorunlara çözüm oluşturmak için geliştirilmiştir.

Bu doğrultuda çalışma prensibi LCM' e benzeyen fakat daha az insan gücü isteyen ve büyük bloklar yerine daha küçük numune veya karot numuneler üzerinde deneyler yapılabilen yeni bir taşınabilir doğrusal kazı deney seti geliştirilmiştir (Şekil 4). Geliştirilen bu deney setinde keski arası mesafe ve kesme derinliği farklı değerlerde ayarlanabilmekte ve böylece farklı şartlarda deneyler yapılabilmektedir.

Taşınabilir doğrusal kazı deney setinde kama ve konik uçlu keski kullanılabildiği gibi 144 mm çapında mini disk keski de kullanılabilmektedir.



**Şekil 4:** Geliştirilen yeni taşınabilir doğrusal kazı deney seti (PLCM®) (Newly developed portable linear cutting machine).



#### 144 mm mini disk keski (144 mm mini disc Cutter)

Geliştirilen yeni taşınabilir doğrusal kazı deney seti (PLCM) tasarlanırken, uluslararası platformda kabul görmüş deney yöntemi olan doğrusal kazı deney seti (LCM) özellikleri dikkate alınmıştır. Şöyle ki; LCM deney setinin küçük ölçeklisi olarak tasarlanan bu deney setinde tam boyutlu doğrusal kazı deney setinde olduğu gibi keski arası mesafe, kesme derinliği gibi değerler kolaylıkla değiştirilerek farklı deney şartlarında veriler elde edilebilmektedir.

Geliştirilen yeni taşınabilir kazı deney seti daha küçük ölçeklerde olduğu için deneylerde LCM deney setinin aksine karot numuneler veya daha küçük blok numuneler üzerinde deneyler yapıldığından deney setinde kullanılacak disk keskinde küçük boyutlarda olması gerekmektedir. Bu doğrultuda standart TBM disk keski özelliklerinde daha küçük boyutlu 144 mm disk çapına sahip mini disk keski imal ettirilmiştir (Şekil 5). Şekil 5' te verilen CCS tip mini disk keski 144 mm disk çapına ve 4 mm disk uç genişliğine sahiptir.



Şekil 5: PLCM deneylerinde kullanılan 144 mm mini disk keski (144 mm mini disc cutter used for PLCM tests).

#### DENEYSEL ÇALIŞMALAR (Laboratory Studies)

##### Fiziksel ve Mekanik Özellikler (Physical – Mechanical Properties)

Homojen bir yapıya sahip olan bej mermer numunesi yapılacak karşılaştırmalarda daha doğru sonuçlar vereceği düşünülerek kaya kesme deneylerinde kullanılmıştır. Bej mermer numunesi için kaya mekaniği deneyleri Amerikan Standart ve Test Metotları (ASTM) ve Uluslararası Kaya Mekaniği Birliği (ISRM) tarafından önerilen standartlara uygun olarak yapılmış olup deney sonuçları Çizelge 2' de verilmiştir.

Çizelge 2: Bej mermer numunesi için fiziksel – mekanik deney sonuçları (Physical – Mechanical Properties for beige marble) .

Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	Dolaylı Çekme Dayanımı (MPa)	P Dalga Hızı (m/s)	S Dalga Hızı (m/s)	Dinamik Elastik Modül (GPa)	Dinamik Poisson Oranı
2.7	160.7	7.82	7109	3419	85.46	0.35

##### LCM Deneyleri (LCM Tests)

Bej mermer numunesi üzerinde yapılan kaya kesme deneylerinde, keski arası mesafe (s) değeri 60 mm olarak ayarlanarak kesme derinliği (d) 1.5, 3 ve 5 mm olacak şekilde farklı kesme derinliklerinde kesme deneylerinin birbirini etkileyebileceği (yardımlı) ve iki farklı kesme deneyinin birbirini

etkilemeyeceği (yardımsız) kaya kesme deneyleri yapılmıştır. Yapılan bu kesme deneyleri Çizelge 3' te özetlenmiştir.

**Çizelge 3:** Bej mermer numunesi üzerinde yapılan LCM deney programı (LCM test program for beige marble).

Numune Adı	Keski Tipi	d mm	Yardımsız Kesme	Yardımlı Kesme
				s=60 mm
Bej mermer	432	1.5	✓	✓
	mm	3	✓	✓
	CCS	5	✓	✓

#### PLCM Deneyleri (PLCM Tests)

3 farklı 20x14x10 cm boyutlarında bej mermer numunesi üzerinde taşınabilir doğrusal kaya kesme deney setinde CCS tip 144 mm mini disk keski kullanılarak kaya kesme deneyleri yapılmıştır. Yapılan bu kesme deneylerinde yaklaşık LCM deneylerinde değerler 1/3 oranında küçültülmeye çalışılmış ve keski arası mesafe (s) değeri 20 mm olarak ayarlanıp kesme derinliği (d) değerleri 1, 3 ve 5 mm olarak değiştirilmiştir. Ayarlanan her bir kesme derinliğinde yardımcı ve yardımsız kaya kesme deneyleri yapılmıştır. PLCM deney programı Çizelge 4' te verilmiştir.

**Çizelge 4:** Bej mermer numunesi üzerinde yapılan PLCM deney programı (PLCM test matrix for beige marble).

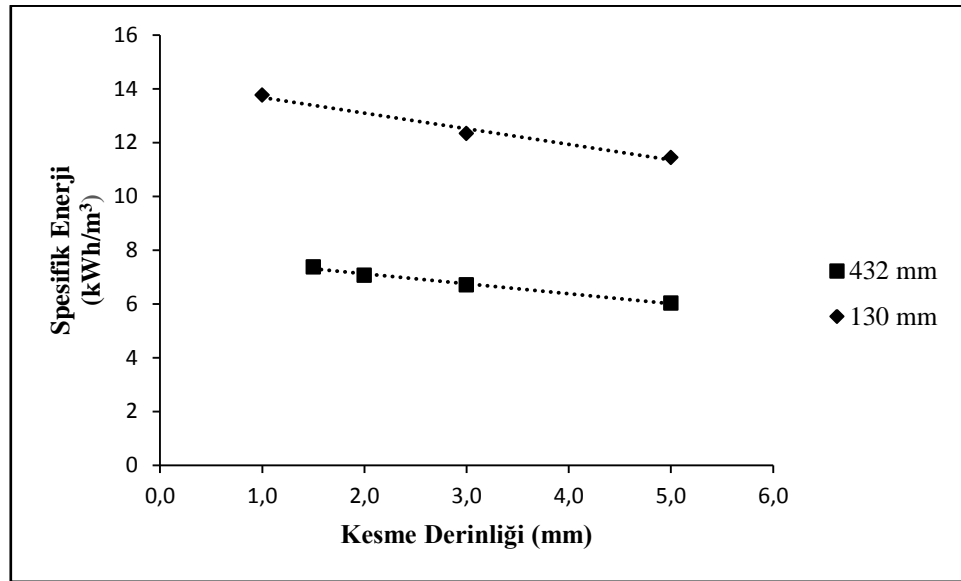
Numune Adı	Keski Tipi	d mm	Yardımsız Kesme	Yardımlı Kesme
				s= 20 mm
Bej Mermer	144 mm Mini Disk	1	✓	✓
		3	✓	✓
		5	✓	✓

#### LCM ve PLCM Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması (Comparison of LCM and PLCM tests results).

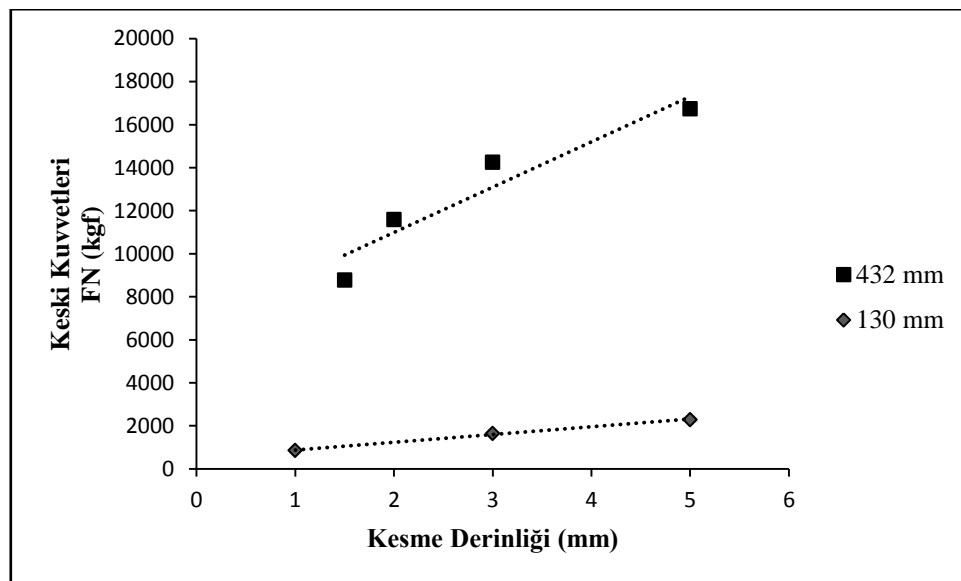
LCM ve PLCM kazı deney setlerinde yapılan yardımsız kaya kesme deney sonuçlarına göre kesme derinliğine bağlı olarak spesifik enerji değişimi Şekil 6' da verilmiştir. Bu şekle göre literatüre uygun olarak hem 432 mm disk keski hem de 144 mm mini disk keski için spesifik enerji değerinin kesme derinliği arttıkça azaldığı görülmüştür. Şekil 7 ve Şekil 8' de ise kesme derinliğine bağlı olarak keski üzerine etki eden normal ve yuvarlanma kuvvetlerinin değişimi verilmiştir.

Şekil 6' da verilen kesme derinliğine bağlı olarak spesifik enerji değişimini gösterir grafiğe bakıldığında; 144 mm çapındaki CCS tip mini disk keski kullanılarak yapılan deneylerden elde edilen spesifik enerji değerinin (yaklaşık 12 – 14 kWh/m<sup>3</sup>), 432 mm CCS tip disk keski kullanılarak yapılan deneyler sonunda elde edilen değerlerden (yaklaşık 6 – 8 kWh/m<sup>3</sup>) yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumun disk keski arasında disk keski çapı, disk uç çapı gibi tasarım parametrelerinin farklılık göstermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Şöyle ki; Şekil 7 ve Şekil 8' de verilen kesme derinliğine bağlı olarak keski üzerine etki eden normal ve yuvarlanma kuvvetlerinin değişimini gösterir grafiklere bakıldığında 432 mm çaplı disk keski üzerine etki eden kuvvet değerlerinin 144 mm çaplı disk keskiye etki eden kuvvet değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir.

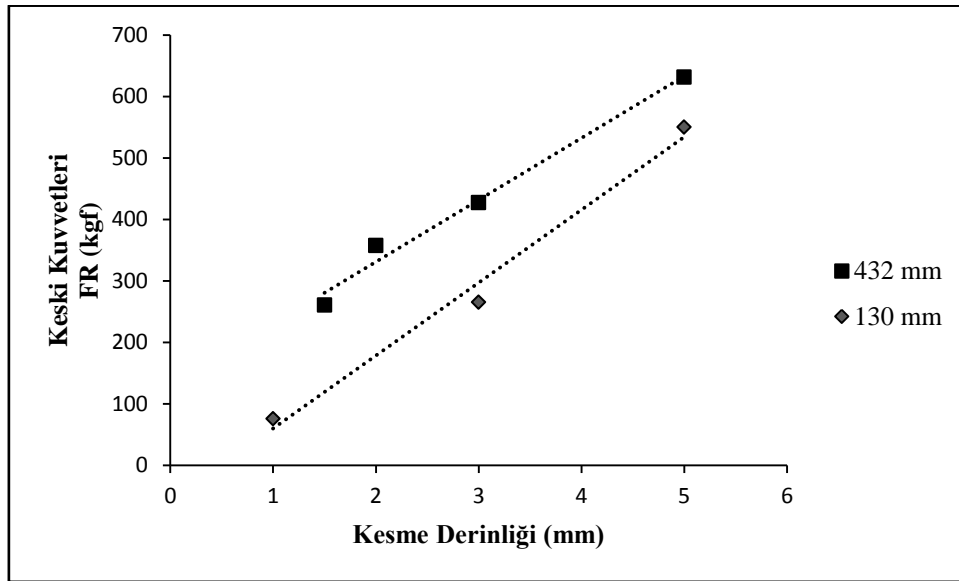




**Şekil 6:** Bej mermer numunesi üzerinde 432 mm disk keski ve 144 mm mini disk keski ile yapılan yardımsız kesme deneyleri için kesme derinliği ile spesifik enerji arasındaki ilişki (The relationship between depth of cut and specific energy for unrelieved rock cutting tests used for 432 mm disk cutter and 144 mm mini disc cutter).

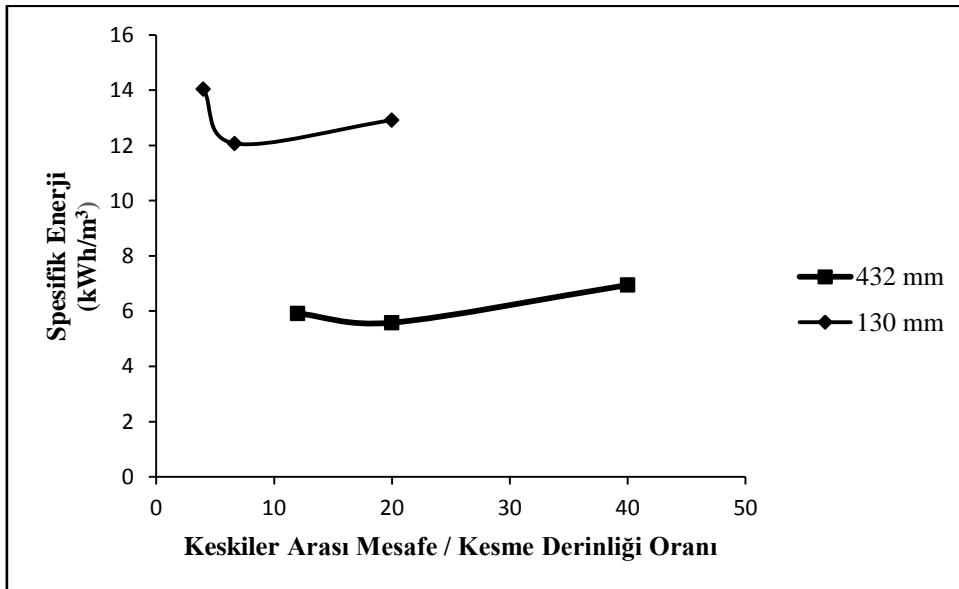


**Şekil 7:** Bej mermer numunesi üzerinde 432 mm disk keski ve 144 mm mini disk keski ile yapılan yardımsız kesme deneyleri için kesme derinliği ile keski üzerine etki eden normal kuvvetler arasındaki ilişki (The relationship between depth of cut and normal forces acting on cutter for unrelieved rock cutting tests used for 432 mm disk cutter and 144 mm mini disc cutter).

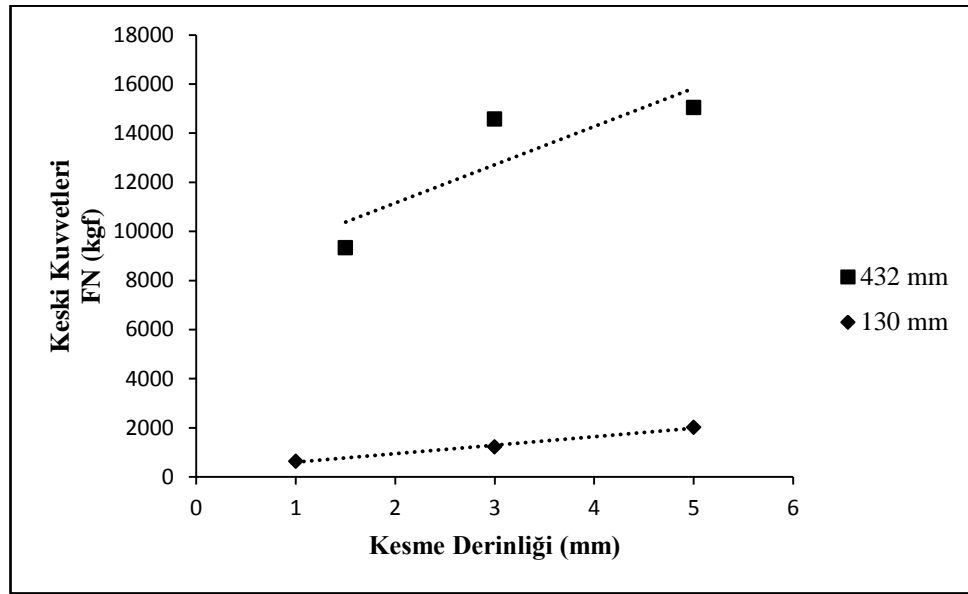


**Şekil 8:** Bej mermer numunesi üzerinde 432 mm disk keski ve 144 mm mini disk keski ile yapılan yardımsız kesme deneyleri için kesme derinliği ile keski üzerine etki eden yuvarlanma kuvvetleri arasındaki ilişki (The relationship between depth of cut and rolling forces acting on cutters for unrelieved rock cutting tests used for 432 mm disk cutter and 144 mm mini disc cutter).

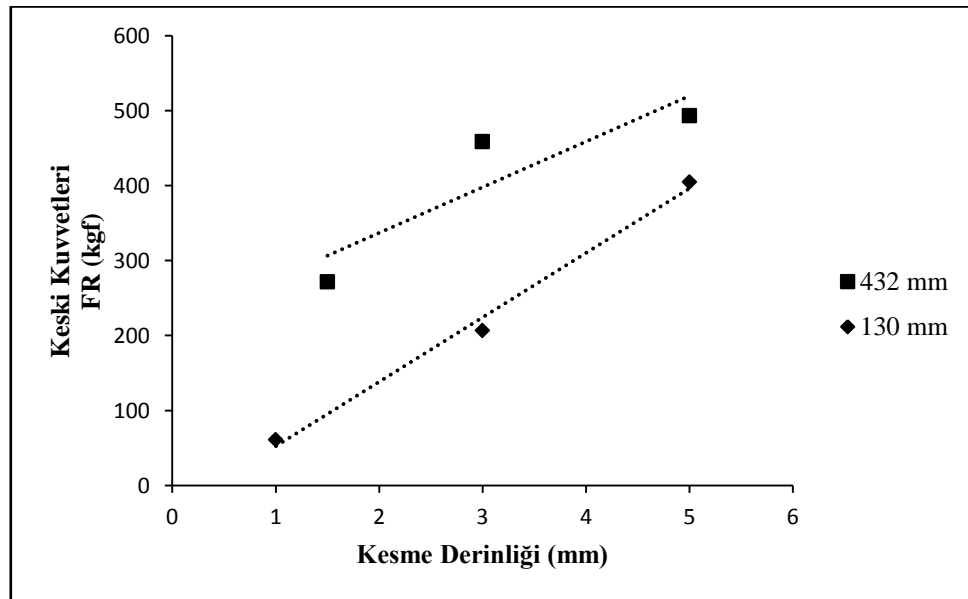
LCM ve PLCM kazı deney setlerinde yapılan yardımcı kaya kesme deneylerinden elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucu elde edilen grafikler ise Şekil 9 – 11’ de verilmiştir. Optimum keski arası mesafe kesme derinliği oranının belirlenebildiği Şekil 9’ da görüldüğü gibi optimum  $s / d$  oranı 432 mm disk keski için 20 iken 144 mm çaplı mini disk keski için bu değer yaklaşık 7 yani 432 mm disk keski için elde edilen değer yaklaşık üçte biri olmuştur. Bu durum mini disk keski çapının 1/3 oranında küçültülmesiyle açıklanabilir. Şekil 10 – 11’ de verilen keski üzerine etki eden normal ve yuvarlanma kuvvetlerinin değişimini gösterir grafiklere bakıldığında ise yardımsız kesme deney sonuçlarında olduğu gibi yardımcı kesme deneylerinde de 432 mm çaplı disk keskiye etki eden kuvvet değerlerinin 144 mm çaplı disk keski üzerine etki eden değerlerden yüksek olduğu görülmektedir.



**Şekil 9:** Bej mermer numunesi üzerinde 432 mm disk keski ve 144 mm mini disk keski ile yapılan yardımcı kesme deneyleri için kesme derinliği / keski arası mesafe oranı ve spesifik enerji arasındaki ilişki (The relationship between cutter spacing / depth of cut ratio and specific energy for relieved rock cutting tests used for 432 mm disk cutter and 144 mm mini disc cutter).



**Şekil 10:** Bej mermer numunesi üzerinde 432 mm disk keski ve 144 mm mini disk keski ile yapılan yardımcı kesme deneyleri için kesme derinliği ile keski üzerine etki eden normal kuvvetler arasındaki ilişki (The relationship between depth of cut and normal forces acting on cutters for relieved rock cutting tests used for 432 mm disk cutter and 144 mm mini disc cutter).



**Şekil 11:** Bej mermer numunesi üzerinde 432 mm disk keski ve 144 mm mini disk keski ile yapılan yardımcı kesme deneyleri için kesme derinliği ile keski üzerine etki eden yuvarlanma kuvvetleri arasındaki ilişki (The relationship between depth of cut and rolling forces acting on cutters for relieved rock cutting tests used for 432 mm disk cutter and 144 mm mini disc cutter).

## SONUÇ ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSIONS)

Yapılan bu çalışmanın temel amacı kayaç kazılabilirliğinin belirlenmesinde güvenilir bir yöntem olarak kullanılan LCM deney setinin dezavantajlarının ortadan kaldırılması için geliştirilen yeni PLCM deney setinin güvenilirliğinin araştırılmasıdır. Bu değerlendirme yapılırken de PLCM deney setinde kullanılan 144 mm mini disk keski ile LCM deney setinde kullanılan 432 mm disk keski arasındaki ilişki irdelenmiştir.

Sonuç olarak yardımcı ve yardımcı olmayan kaya kesme deney sonuçlarını gösteren grafiklere bakıldığında 144 mm mini disk keski için elde edilen sonuçların gerçek boyutlarda olan 432 mm disk

keski sonuçlarına benzer sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Böylece kayaç kazılabilirliğinin belirlenmesinde 144 mm mini disk keskinin kullanımının mümkün olacağı sonucuna varılmıştır.

İki disk keski arasında farklı olarak; ilgili grafiklere bakıldığında 144 mm mini disk keskinin üzerine etki eden normal ve yuvarlanma kuvvetlerinin daha az olduğu görülmektedir. Keski üzerine etki eden kuvvetlerin farklılığına bağlı olarak yardımcı kesme deney sonuçlarında da optimum keskinin mesafe kesme derinliği oranının da farklılık gösterdiği görülmekte ve keski boyutlarının farklı olmasının bu durumun temel sebebi olduğu düşünülmektedir. Bu farklılıkların daha sonra her iki disk keski kullanılarak farklı kayaçlar üzerinde birçok kaya kesme deneyi yapıp iki deney seti arasında geçiş için bir katsayının belirlenmesiyle aşılması hedeflenmektedir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Balcı, C., 2004, Mekanize kazı makinelerinin seçiminde küçük boyutlu kazı ile büyük boyutlu kazı deneylerinin karşılaştırılması, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, s269.
- Balcı, C., Bilgin, N., 2007, Correlative study of linear small and full – scale rock cutting tests to select mechanized excavation machines, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 44, No. 3, pp. 468-476.
- Balcı, C., Tumaç, D., 2012. Investigation into the effects of different rocks on rock cuttability by a V-type disc cutter. Tunnelling and Underground Space Technology 30, 183-193.
- Bilgin, N., 1977. Investigation into mechanical cutting characteristics of some medium and high strength rocks. PhD Thesis, University of Newcastle Upon Tyne, UK.
- Bilgin, N., Shahriar, K., 1987, "Madenlerde mekanize kazı için bir ölçme sisteminin geliştirilmesi ve T.T.K. Amasra kömür bölgesine uygulanışı", Tübitak Projesi, MAG, Proje No: 674, 99s.
- Bilgin, N., 1989. İnşaat ve Maden mühendisleri için uygulamalı kazı mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Bilgin, N., Çopur, H., Balcı, C., Feridunoğlu, C., Tumaç, D., 2006, Kaya kazı makinelerinin optimum seçiminde kullanılmak üzere taşınabilir bir test cihazının geliştirilmesi, TUBİTAK Araştırma Projesi Nihai Rapor, Proje No: MİSAG- 274 (104M013).
- Ceylan, K., 1987, Studies on the cuttability of rocks at O.A.L. Çayırhan district by laboratory cutting tests, METU (ODTÜ), Master Thesis.
- Dursun, A. E., 2012, "Konya şehir merkezinin kuzey batısında yeralan kireçtaşlarının kesilebilirliği" Selçuk Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı doktora tezi.
- Eskikaya, S., Bilgin, N., ve diğ., 2000, Development of rapid excavation technologies for the Turkish mining and tunnelling industries, NATO TU-Excavation Sff Programme Project Report: 172, Istanbul Technical University.
- Feridunoğlu, O.,C., 2009, Kayaç kazılabilirliğinin tayini için taşınabilir kayaç kesme deney aletinin geliştirilmesi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi.
- Franklin, J. A., and Dusseault, M. B., 1989, Rock Engineering, New York: McGraw-Hill.
- ISRM, 1981, Rock characterization testing and monitoring ISRM suggested methods, suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks, Part3, pp. 101-103.
- J.E.Friant, L. Özdemir, (Çeviren : Prof. Dr. Ş. Eskikaya), 1994, "Tünel Açma Teknolojisi Bugün ve Yarın", İTÜ Maden Fakültesi Tünel ve Galeri Açma Meslek İçi Semineri.
- Maidle, B., Schmidz, L., Ritz, W., and Herrenknecht, M., 2008. Hard rock tunnel boring machines, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und Technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, ISBN 978-3-433- 01676-3, Berlin.
- McFeat – Smith, I., Fowell, R. J., 1977, Correlation of rock properties and the cutting performance of tunneling machines, Proc. Conference on Rock Engineering, The University of Newcastle Upon Tyne, 581-602.
- Morrell, J., W., Bruce, W.,E., and Larson, D.,A., 1970, Tunnel boring technology: disc cutter experiments in sedimentary and metamorphic rocks, U.S. Dept. of the Interior.

- Özdemir, L., Miller, R. S., and Wang F.D., 1978. Mechanical tunnel boring prediction and machine design. Report to National Science Foundation, Colorado School of Mines, Golden, pp. 313.
- Phillips, H. R., Bilgin, N. and Price, D. L., 1978, The influence of type tip geometry on the design of disc cutter arrays, Proc. 3rd Austin Tunnelling Conference, Sydney, pp. 48-52.
- Rostami, J., Ozdemir, L., 1993, A new model for performance prediction of hard rock TBM's, Proceedings of Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC), Boston MA, June 13-17, pp. 793-809.
- Roxborough, F. F., Phillips, H. R., 1975, Rock excavation by disc cutter, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 12, pp. 361 366.
- Stack, B., 1995, Encyclopaedia of tunnelling mining and drilling equipment, Vol 1-2, Mining Hobart Mudén Publishing Company, Hobart, Australia, pp. 1911.
- The Robbins Company, 2001. Robbins Tunnel Machine Projects, Seattle.
- Tumaç, D., 2010, Değişik kayaç ve disk keskilerin kayaç kazılabilirliği üzerine etkisinin araştırılması, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi.